

第五篇 直流电机之

第十七章

直流发电机和直流电动机

授课教师：花为

东南大学电气工程学院电机与电器系

Email: huawei1978@seu.edu.cn

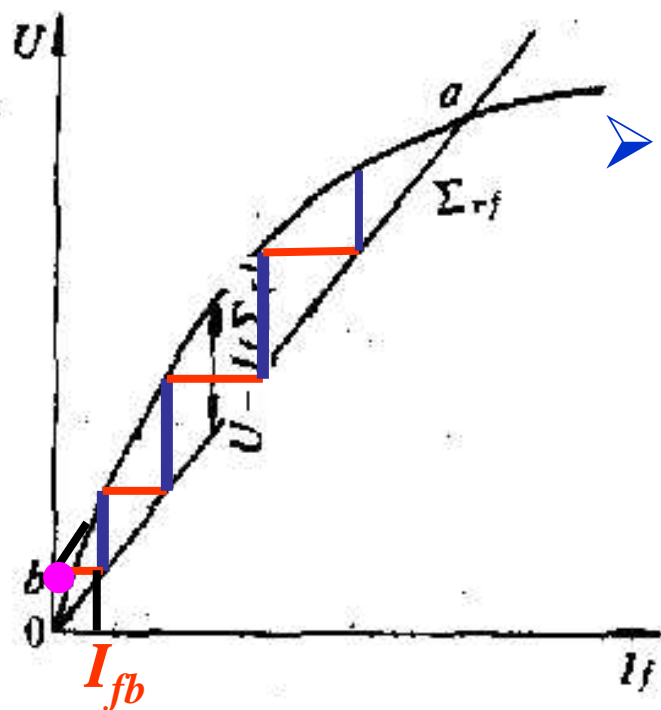
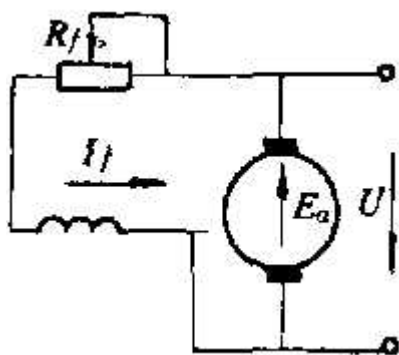
http://ee.seu.edu.cn/te_187.htm

第十六章

直流发电机和直流电动机

- 自励发电机的电压建立 ✓
- 直流发电机的运行特性 ✓
- 直流电动机的机械特性和工作特性 ✓
- 直流电动机的起动、调速和制动 ✓
- 直流电机的换向和改善换向的方法 ×

1. 自励发电机的电压建立

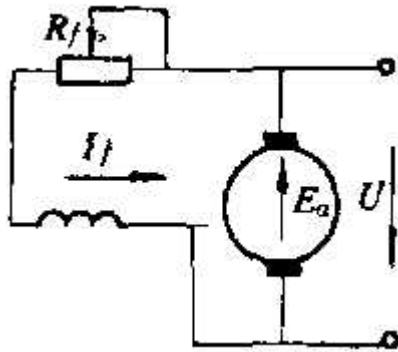


- 起动开始, $U=0$, 励磁电流 $I_f=0$
- 由于铁心存在剩磁, 当电枢旋转时, 电枢绕组中有小的感应电势 (b 点), 在励磁绕组中产生微小的励磁电流 I_{fb}
- 若 I_{fb} 产生的磁势与剩磁同方向, 则使磁场增强, 电枢端电压随之增加, 并产生更大的激磁电流

a 点之前: $U - I_f \sum r_f = L_f \frac{dI_f}{dt} > 0$

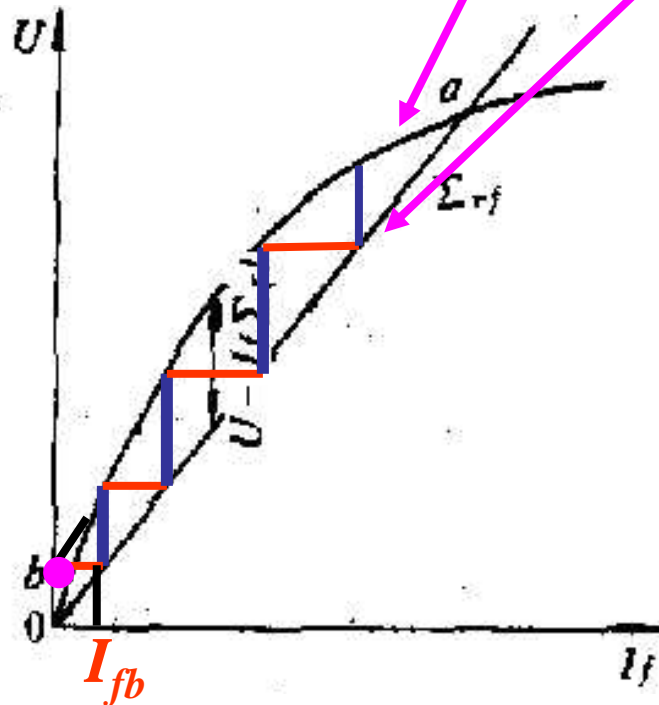
a 点: $U = I_f \sum r_f + L_f \frac{dI_f}{dt}$

1. 自励发电机的电压建立



$U_0 = E_0 = f(I_f)$ 空载特性曲线: 磁化曲线

$U_0 = I_f \sum r_f$ 励磁回路电压方程: 场阻线



自励发电机的电压建立条件:

➤ 磁路的因素

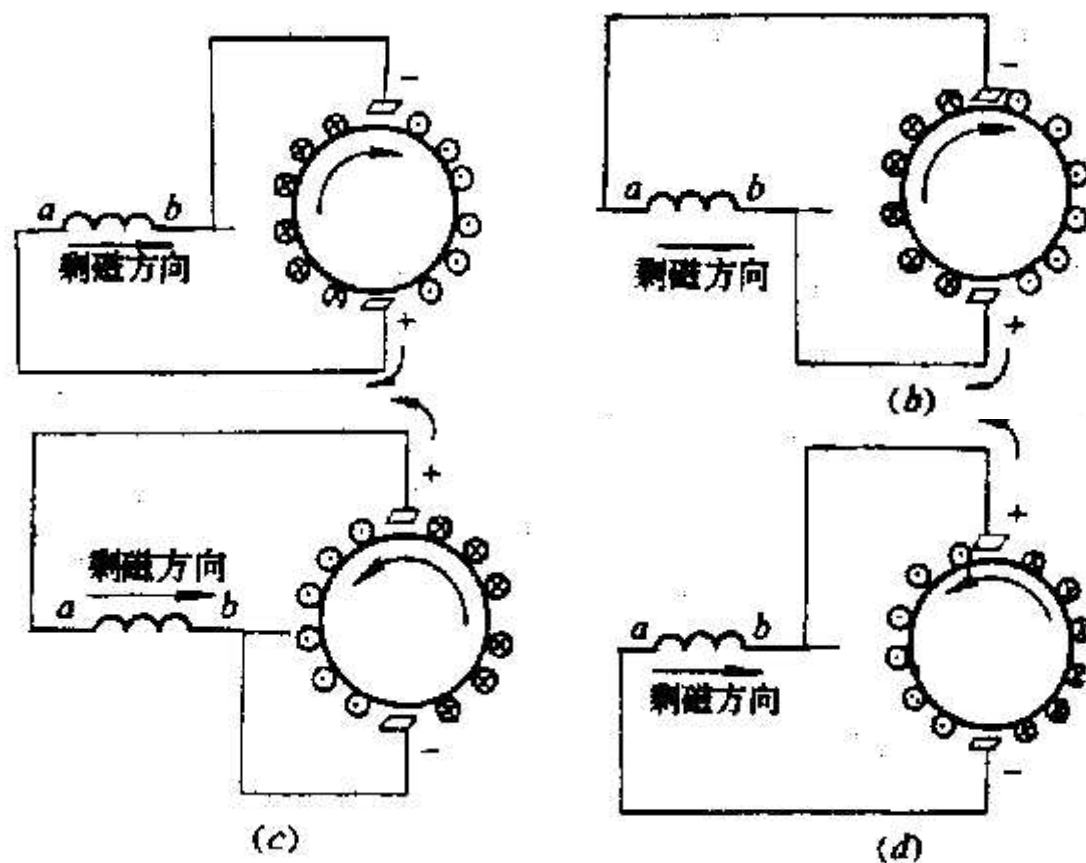
- 存在剩磁
- 磁化曲线饱和现象

铁磁材料的饱和现象, 使得磁化曲线与场阻线存在交点, 即电机有确定的电压。

1. 自励发电机的电压建立

自励发电机的电压建立条件:

- **电路的因素:** 励磁绕组的接法与电枢旋转方向正确配合。使最初的微小励磁电流增强原来的剩磁，使感应电势增加。



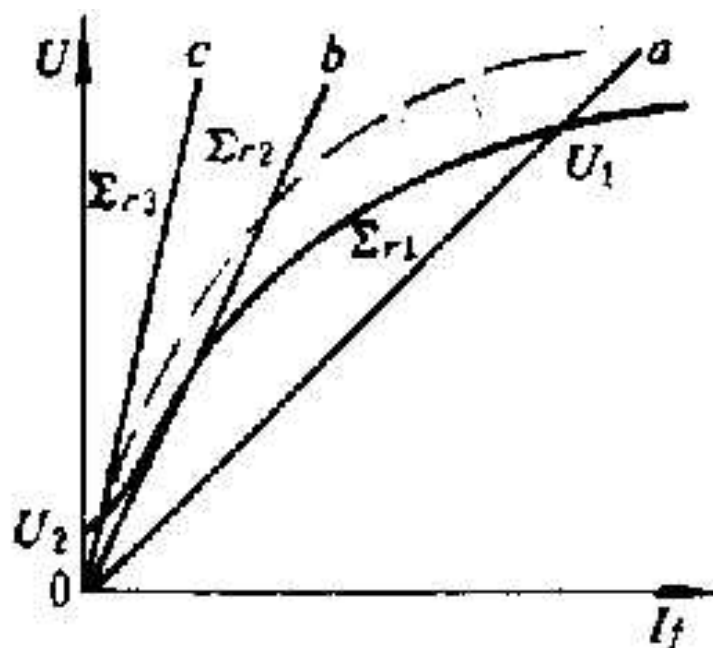
1. 自励发电机的电压建立

自励发电机的电压建立条件:

➤ 励磁回路的影响: 励磁回路的总电阻小于该转速时的临界电阻。

➤ 临界电阻: 指一定转速时, 与磁化曲线的直线部分(气隙线)重合的场阻线

$$\sum r_3 > \sum r_2 > \sum r_1$$

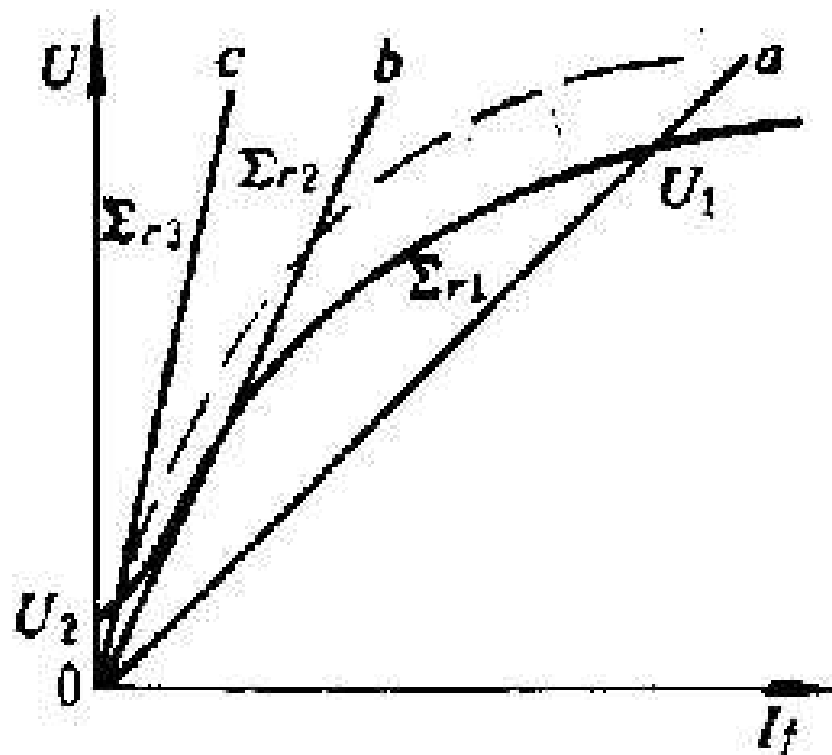


0b线: 场阻 r_2 , 场阻线与气隙线重合, 无明确的交点, 电压不能稳定。且场阻的微小变化将引起端电压的较大变化

0a线: 场阻 r_1 (较小), 稳定端电压 U_1

0c线: 场阻 r_3 (较大), 建立电压 U_2 很小, 电压无法建立

1. 自励发电机的电压建立



提高电机转速：

➤ 磁化曲线发生变化，如图中虚线，**临界场阻随转速增加而增大**。

➤ 假设电机场阻不变，如果原临界场阻小于电机场阻不能自励。此时转速增加后临界场阻大于电机场阻，则电压可以建立。

空载电压与励磁回路电阻的大小和电机转速高低有关。

2. 直流发电机的运行特性

➤ 他励发电机的特性

- 空载特性
- 外特性
- 调节特性

➤ 并励发电机的特性

- 空载特性
- 外特性

➤ 串励发电机的特性

- 空载特性
- 外特性

➤ 复励发电机的特性

2. 直流发电机的运行特性

➤ 直流发电机的主要变量：

端电压 U ，励磁电流 I_f ，负载电流 I_L ，电机转速 n

➤ 保持转速保持不变，其余三个变量中任意变量保持不变，其余两个变量之间的关系用曲线表示：

- 外特性：

$$I_f = \text{const}, U = f(I_L)$$

- 负载特性：

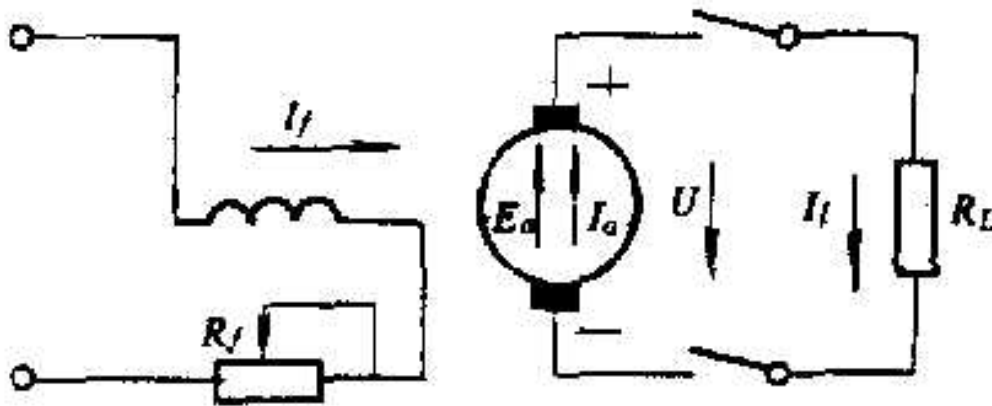
$$I_L = \text{const}, U = f(I_f)$$

- 调节特性

$$U = \text{const}, I_f = f(I_L)$$

I 他励发电机的特性

- 励磁电流不随负载电流变化
- 励磁可调，电压调节范围大，适用于要求电压广泛可调的应用场合。工业上低压（4-24V）及高压（>600V）以上均为他励。



如何改变电机端电压极性？

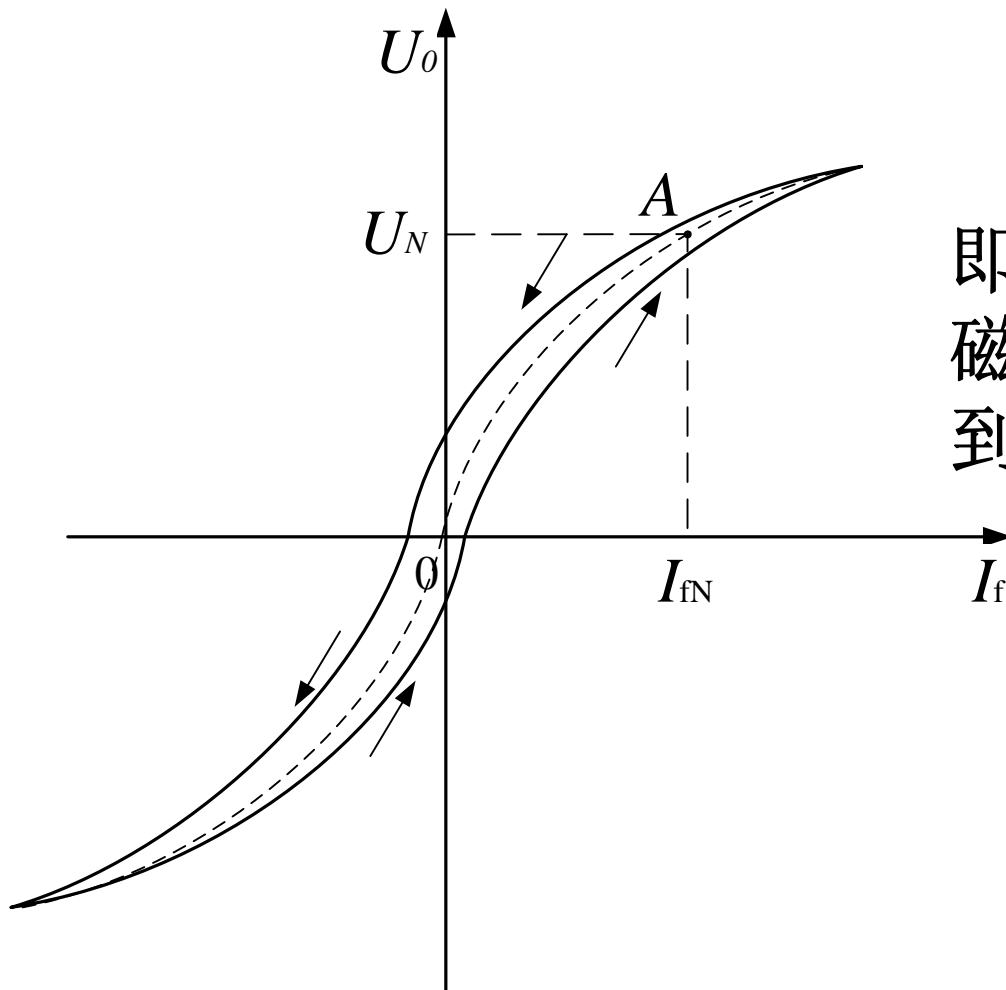
取决于电枢电势的方向，

$$E_a = C_e \Phi n$$

1. 改变转向，而磁通方向不变
2. 改变磁通方向，而转向不变

I 他励发电机的特性

(a) 空载特性 $U_0 = f(I_f), \quad I_L = 0$



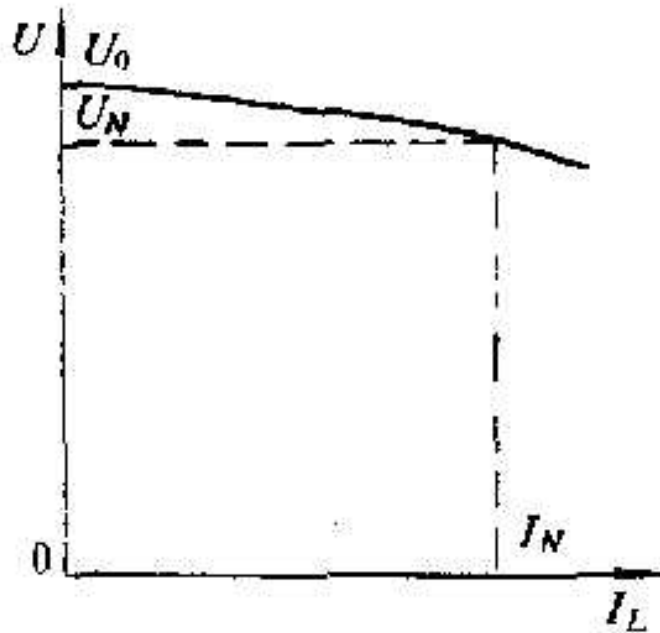
即电机的**磁化曲线**，通过磁路计算，或空载实验得到。

I 他励发电机的特性

(b) 外特性 $U = f(I_L) \quad I_f = \text{const}$

$$E_a = U + I_a r_a + 2\Delta U \quad \rightarrow \quad U = E_a - \underline{I_a r_a} - \underline{2\Delta U}$$

$$\underline{E_a} = C_e n \underline{\Phi}$$



端电压下降的因素:

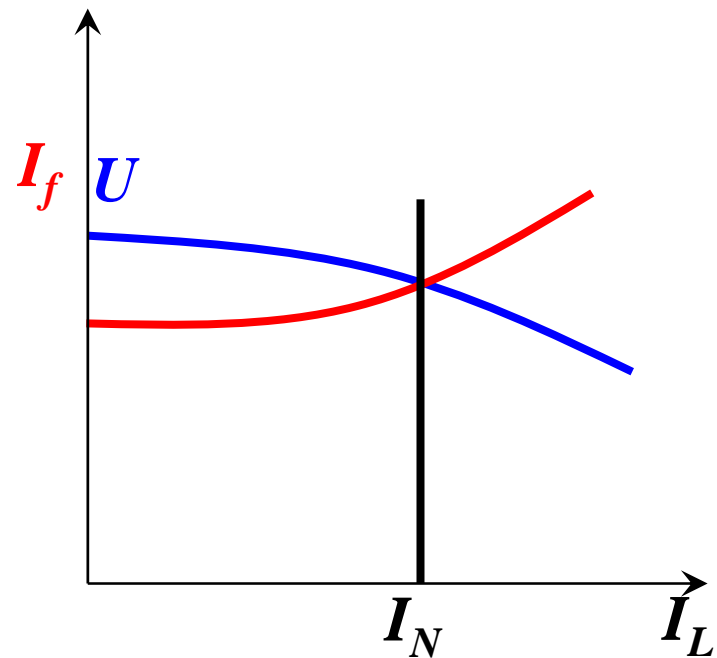
- 电枢回路中引起的电压降
- 电枢反应的去磁作用

$$\text{电压变化率} = \frac{U_0 - U_N}{U_N}$$

通常约为 **5%~10%**

I 他励发电机的特性

(c) 调节特性 $I_f = f(I_L) \quad U = \text{const}$



$$U = E_a - I_a r_a - 2\Delta U$$

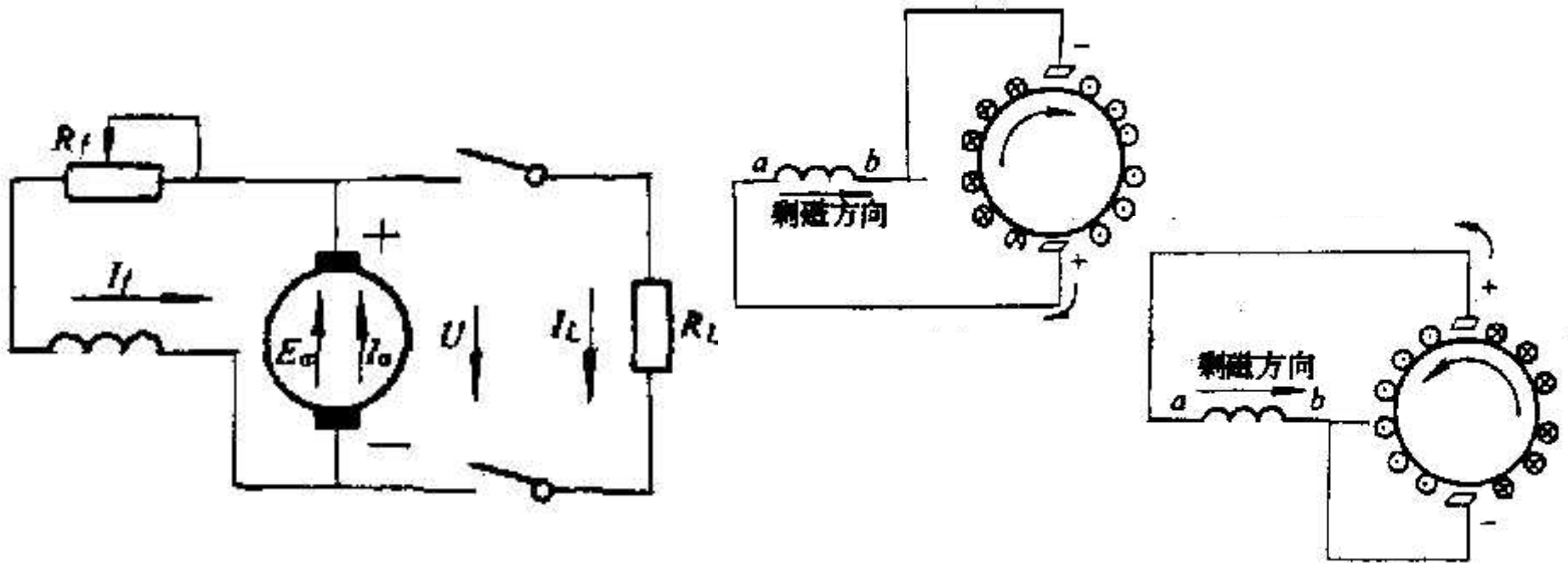


当有负载电流时，为要维持端电压不变，随着负载电流的增大，励磁电流相应增大

II 并励发电机的特性

- 励磁绕组与电枢绕组并联，励磁电流由发电机电枢绕组自己供给，随电枢电压变化
- 如何改变电机端电压极性？

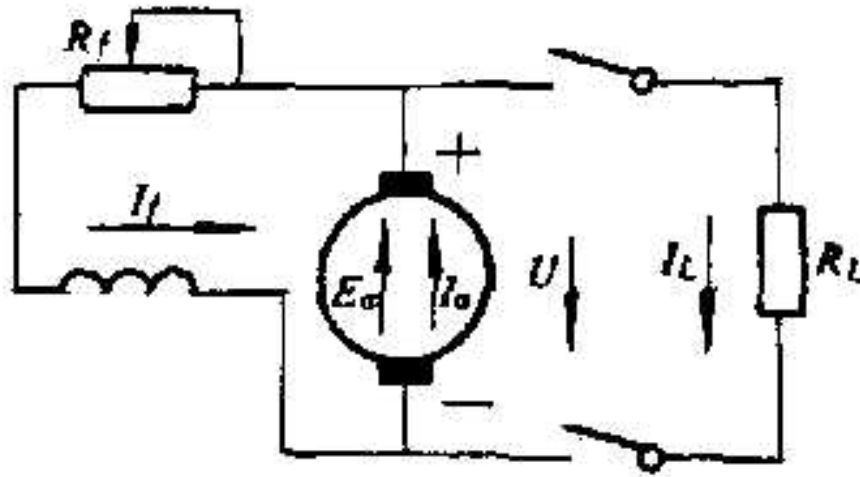
改变电刷间极性时应注意电压建立的问题，即改变原动机转向时必须改变绕组的相对连接，使感应电势与剩磁方向一致。



II 并励发电机的特性

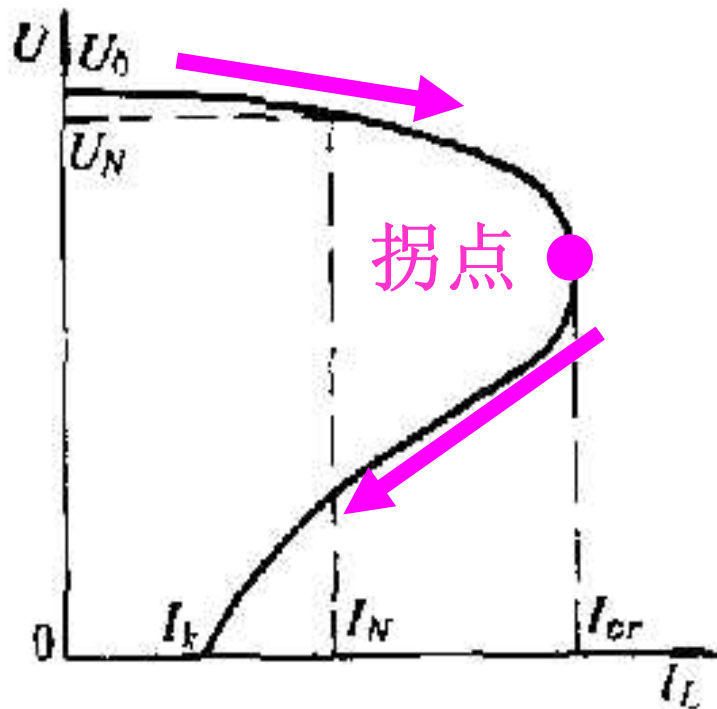
(a) 空载特性 $U_0 = f(I_{f0} = I_{a0}), I_L = 0$

- 并励发电机在空载时，电枢电流等于励磁电流。由于励磁电流很小，它流过电枢绕组所产生的电阻压降和电枢反应很小，故空载时的感应电势即可认为与空载端电压相等，所以，并励发电机的空载特性和它的磁化曲线相同。



II 并励发电机的特性

(b) 外特性 $U = f(I_L), I_f = \text{const}$



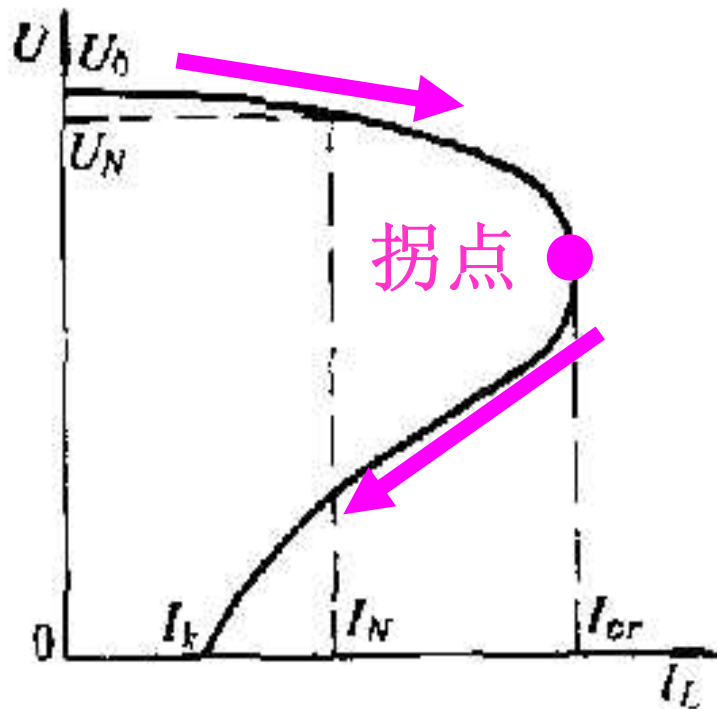
电压变化率约为20%

端电压下降的因素:

- 电枢回路的电压降;
 - 电枢反应的去磁作用;
 - 端电压下降引起的励磁电流减小。
- 当负载电阻不断减小时, 负载电流 I_L 增加;
 - 但当降至某一临界数值 I_{cr} 以后, 若负载电阻继续减小, 则负载电流 I_L 反将逐渐减小;
 - 当电枢两端直接短路, 负载电流将降为微小的短路电流 I_k 。

II 并励发电机的特性

(b) 外特性 $U = f(I_L), I_f = \text{const}$



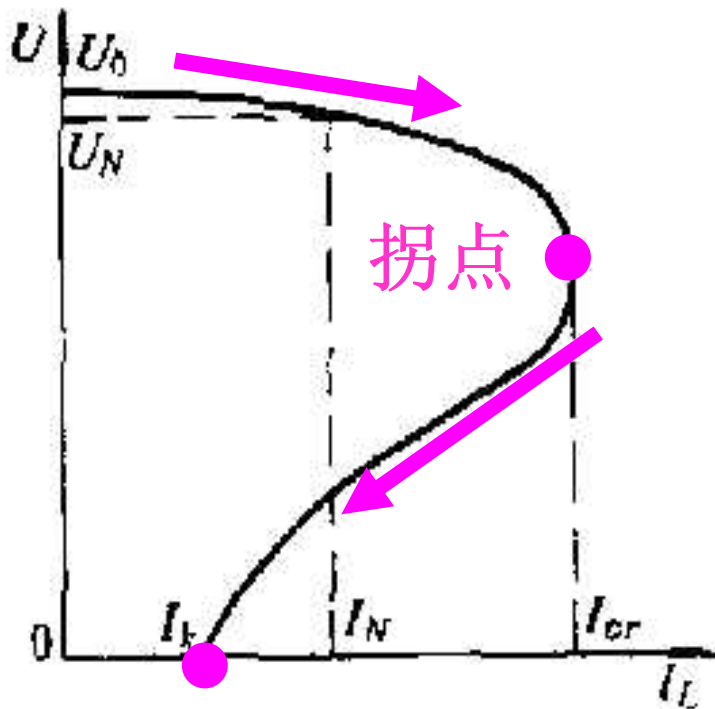
电压变化率约为20%

拐点产生的原因:

- 负载电阻减小后，一方面使负载电流增加，端电压下降；另一方面，端电压下降后，使励磁电流减小，电势下降，使负载电流下降
- 当电压较高时，磁路饱和，励磁电流对电势影响不大，负载电流随电阻下降而增大
- 当电流达到临界值时，磁路退出饱和，励磁电流的微小变化引起感应电势的较大变化，负载电流下降

II 并励发电机的特性

(b) 外特性 $U = f(I_L), I_f = \text{const}$



电压变化率约为20%

短路电流的解释:

直接短路时，端电压 $U=0$ ，励磁绕组电压等于0。励磁电流为0，感应电势仅为剩磁电势，并引起短路电流 I_k 。

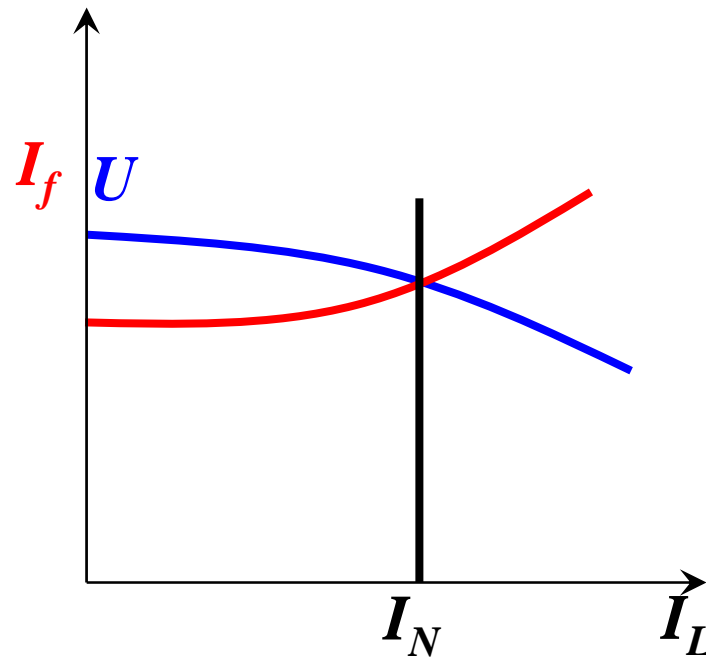
短路的影响:

➤ 短路过程经过临界电流，约为额定电流的2~3倍；

➤ 突然短路的瞬间：由于励磁绕组有很大的电阻，磁通不能立即变为零， i_{\max} 可达 $8\sim 12 I_N$ 。

II 并励发电机的特性

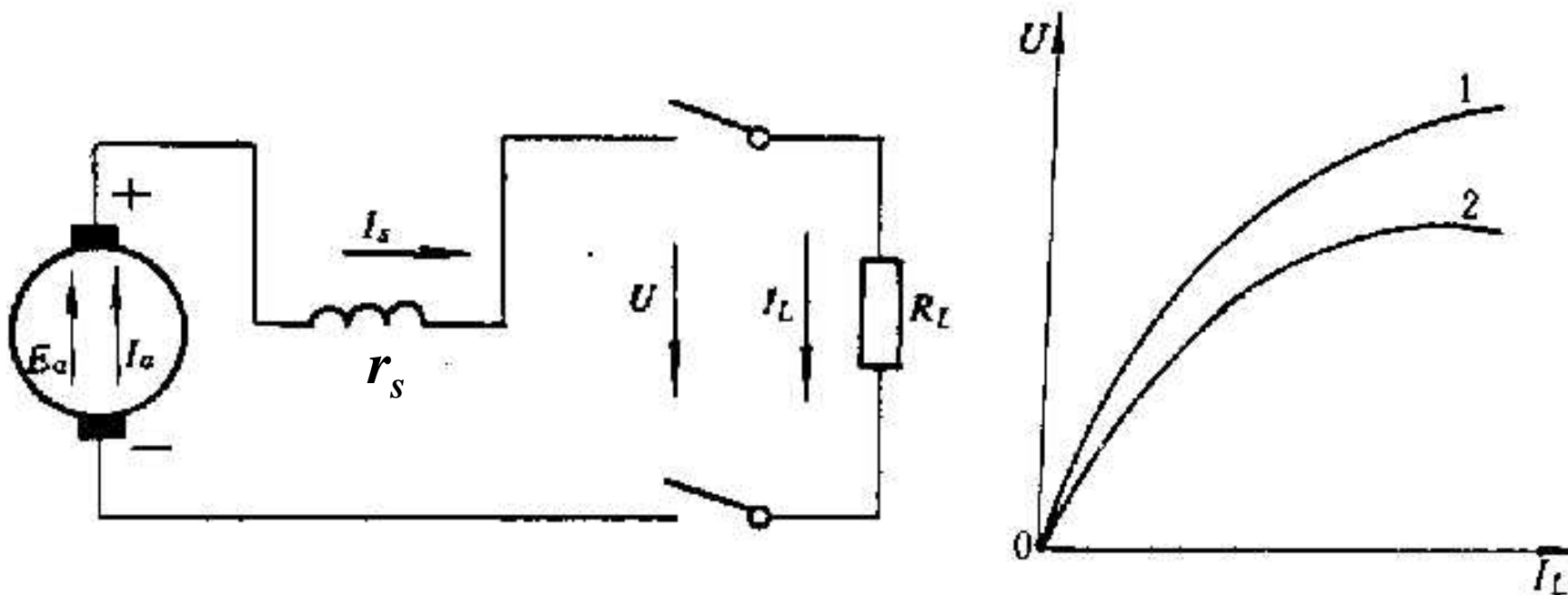
(c) 调节特性 $I_f = f(I_L) \quad U = \text{const}$



III 串励发电机的特性

(a) 空载特性 ~~$U_0 = f(I_f), I_L = 0$~~

- 由另外电源供给励磁电流，以他励方式求得电机的空载特性，即磁化曲线。因为励磁绕组匝数较少，所需励磁电流较大，所得磁化曲线的形状与其他发电机相似，如图中曲线1所示。

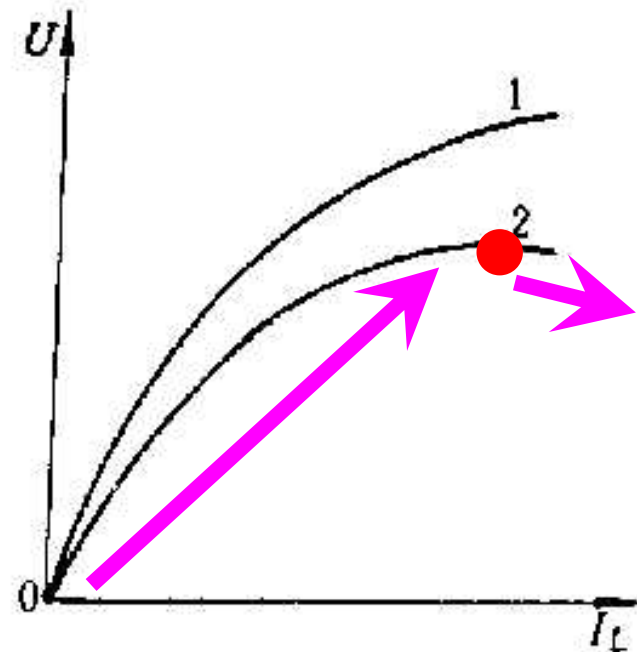
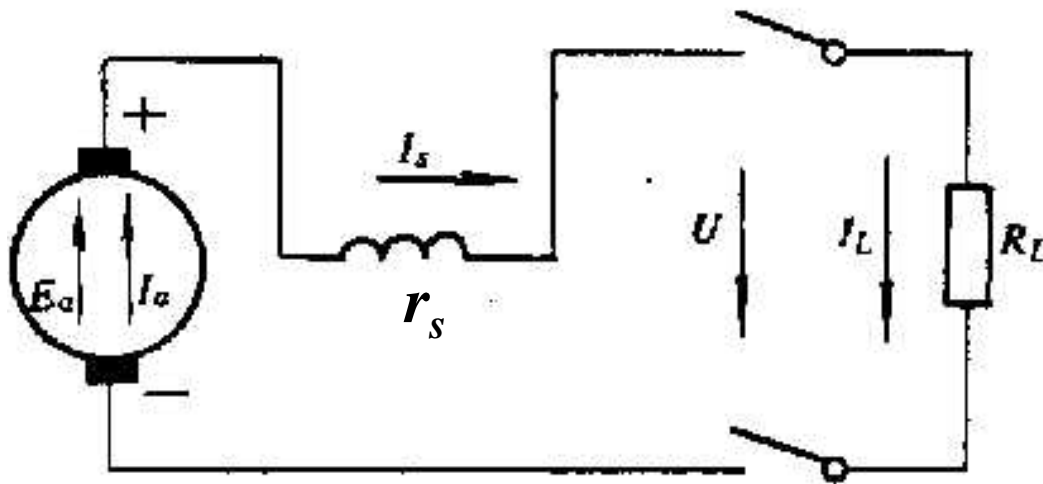


III 串励发电机的特性

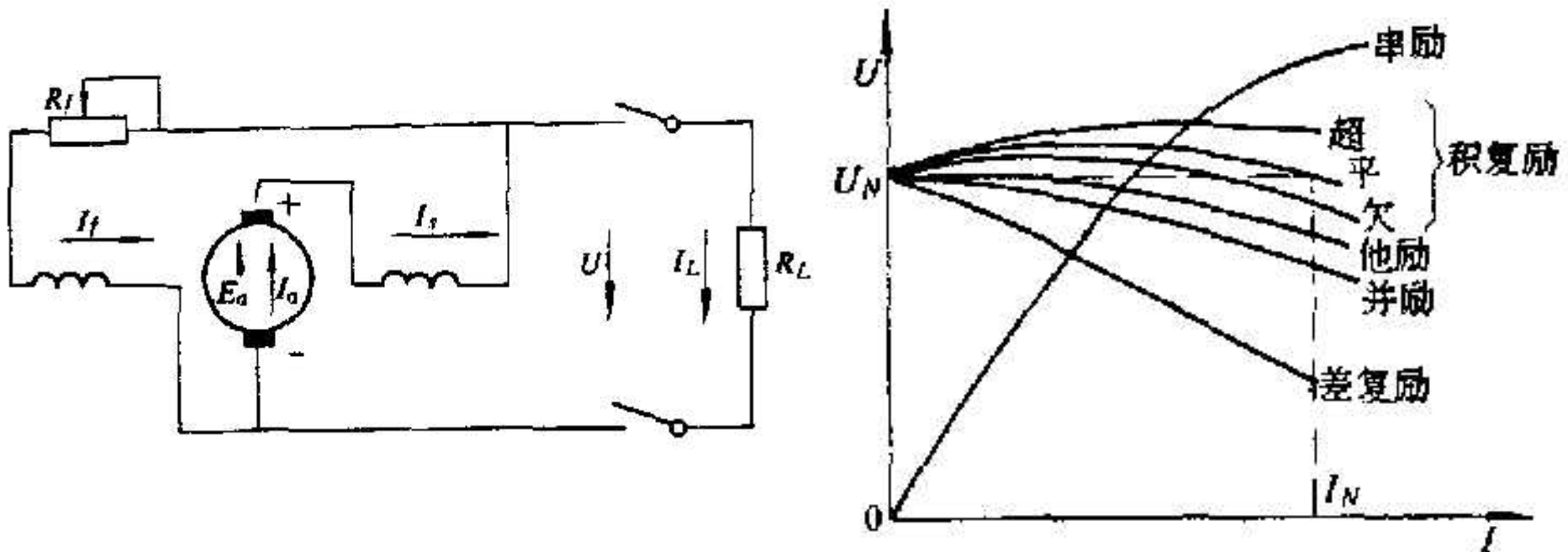
(b) 外特性 $U = f(I_L), \quad I_f = \text{const}$

$$I_L = I_s = I_a \quad U = \underline{E_a} - \underline{I_a(r_a + r_s)} - 2\Delta U$$

$I_L \uparrow \rightarrow I_s(I_f) \uparrow$



IV 复励发电机的特性



复励发电机的外特性界于并励发电机与串励发电机外特性之间。复励的程度决定于串联励磁与并联励磁的相对强度，并联励磁通常要比串联励磁强的多。

有平复励（恰好补偿）、超复励（过补偿）、欠复励之分。

3. 直流电动机的 机械特性和工作特性

- 并励电动机的特性
 - 转矩特性
 - 转速特性
- 串励电动机的特性
 - 转矩特性
 - 转速特性
 - 机械特性
- 复励电动机的特性
- 永磁直流电动机
- 直流电动机稳定运行条件

3. 直流电动机的 机械特性和工作特性

直流电动机的作用原理

- 电枢绕组和励磁绕组分别施加直流电源。气隙中主磁通与电枢电流相互作用产生电磁转矩，

$$T = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = C_T \Phi I_a$$

- 电磁力矩为原动力矩，在电磁力矩的作用下，驱动轴上的机械负载旋转
- 电枢绕组感应电势为

$$E_a = \frac{p}{a} N \frac{n}{60} \Phi = C_e \Phi n$$

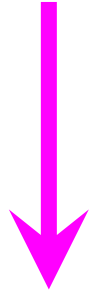
3. 直流电动机的机械特性和工作特性

➤ 转矩特性 $T = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = C_T \Phi I_a$

➤ 转速特性 $n = \frac{U - I_a \sum r_a - 2\Delta U}{C_e \Phi}$

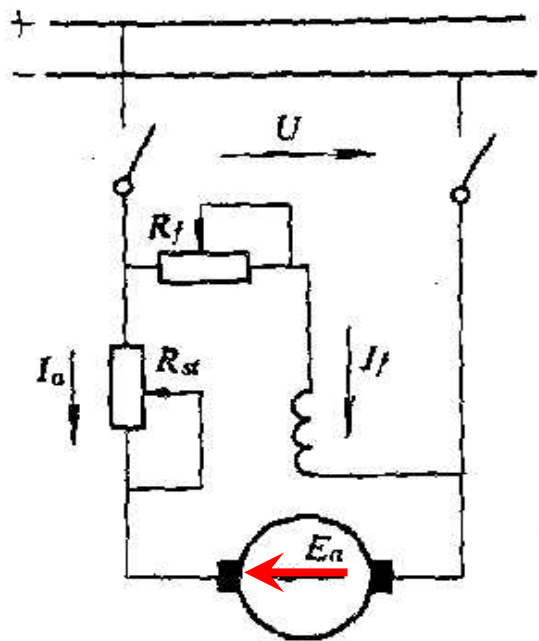
} 消去 I_a

➤ 转速与转矩特性（机械特性， T - n 曲线）

$$n = \frac{U - 2\Delta U}{C_e \Phi} - \frac{\sum r_a}{C_e C_T \Phi^2} T$$


在不同的励磁方式下，主磁通随负载电流的变化不同，导致电机特性的差异。

I 并励电动机的特性

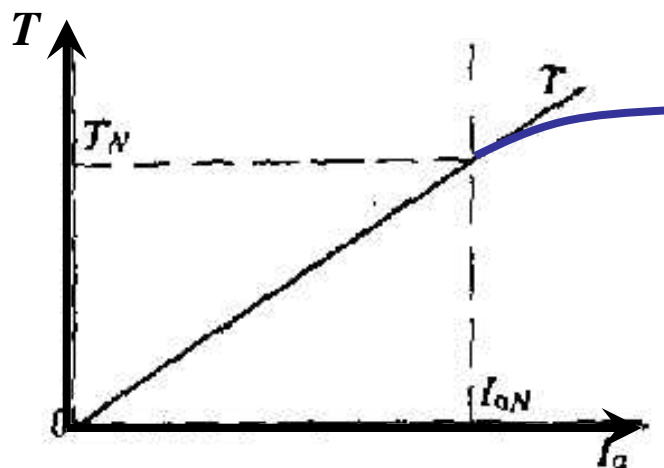


1. 转矩特性 $T=f(I_a)$

$$\text{励磁电流 } I_f = \frac{U}{\sum r_f} = \text{const}$$

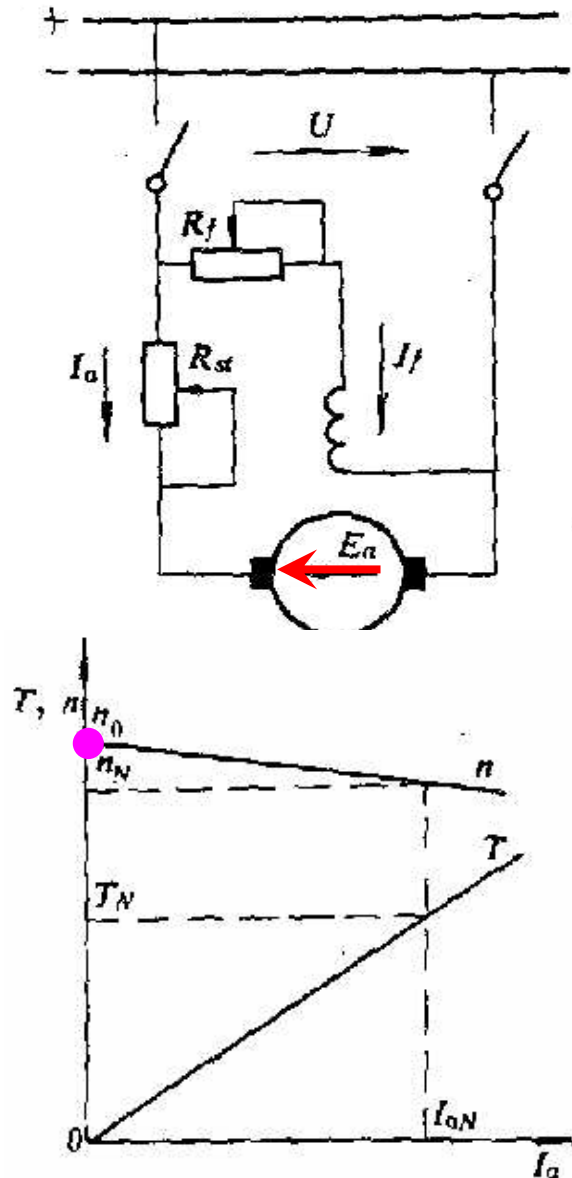
➤ 当负载电流很小时，电枢反应的去磁作用很小，近似认为主磁通不变，则电磁转矩与电枢电流成线性关系

➤ 当负载电流较大时，电枢反应去磁作用使主磁通有所减小，曲线向下弯曲



$$T = C_T \Phi I_a \propto I_a$$

I 并励电动机的特性



2. 转速特性 $n=f(I_a)$

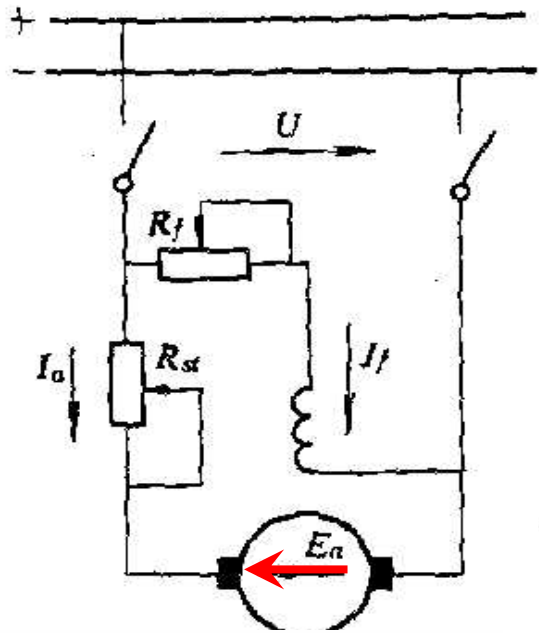
$$n = \frac{U - I_a \sum r_a - 2\Delta U}{C_e \Phi}$$

➤ $I_a=0$ ，即空载时， $n_0=U/(C_e\Phi_0)$

➤ 负载电流增加，电枢电阻压降增大，如不计电枢反应的去磁作用即主磁通不变，则 n 随 I_a 的增加而有所减小，形成向下的机械特性

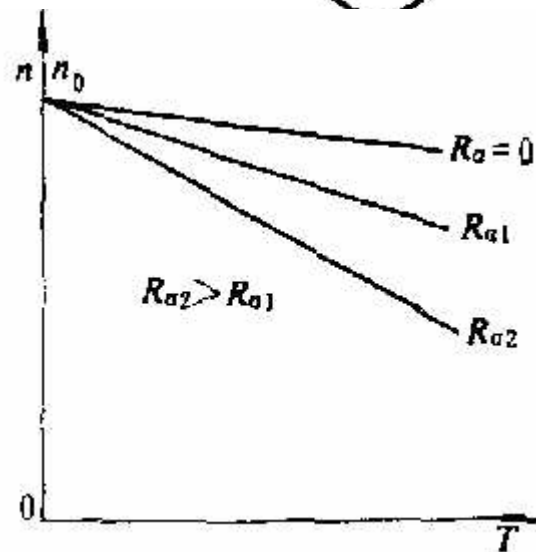
➤ 如考虑电枢反应的去磁作用将使每极磁通 Φ 减少，并励电动机的转速变化很小。电阻电压降的影响影响较大，转速特性是略为下倾的——硬特性

I 并励电动机的特性



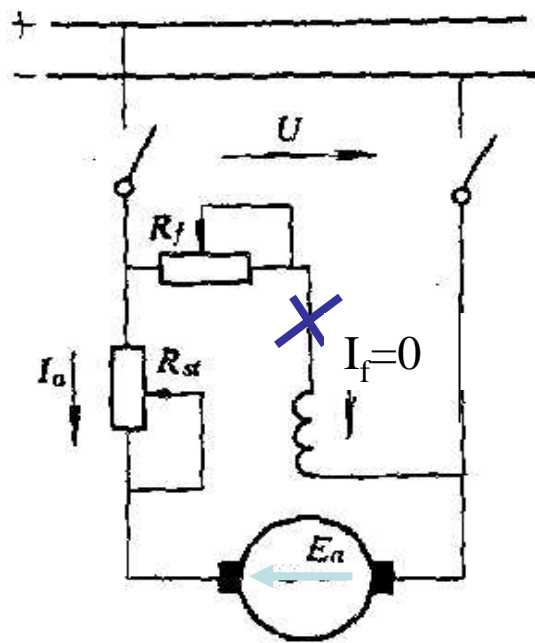
3. 机械特性 $n=f(T)$

$$n = \frac{U - 2\Delta U}{C_e \Phi} - \frac{\sum r_a}{C_e C_T \Phi^2} T$$



- 主磁通由于负载电流去磁作用的影响随电流增加而略有减小
- $R_a=0$ 时，称为自然机械特性：硬特性
- 增加电枢回路串联电阻，则机械特性变软

并励电动机励磁失磁的分析



➤ 当励磁回路断路时，气隙中的磁通将骤然降至微小的剩磁，电枢回路中的感应电势也将随着减小；

➤ 由于惯性，电机速度不能突变，电枢电流将急剧增加，使电动机严重过载；

电磁转矩的变化：

(1) 当电枢电流的增加程度不足以补偿每极磁通的减小程度时，电磁转矩减小，因而使电动机减速；

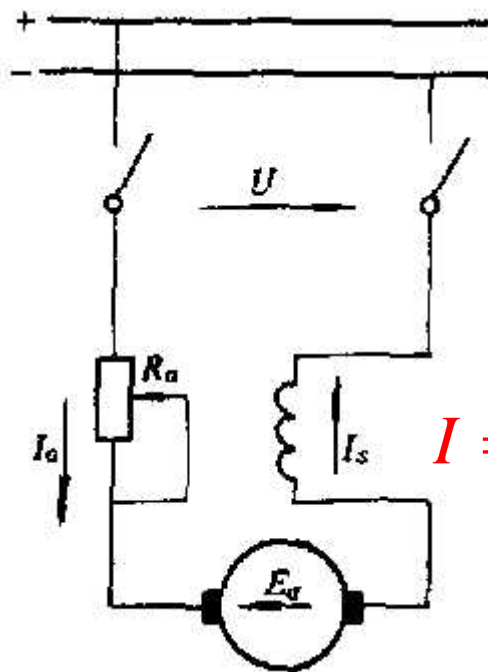
(2) 当电枢电流的增加程度超过每极磁通的减小程度时，电磁转矩将增大，使电动机加速，直至转速上升到危险的高值（达到电压平衡）。

$$E_a = \frac{p}{a} N \frac{n}{60} \Phi = C_e \Phi n$$

$$T = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = C_T \Phi I_a$$

$$E_a = U - I_a \sum r_a - 2\Delta U$$

II 串励电动机的特性



1. 转矩特性 $T=f(I_a)$

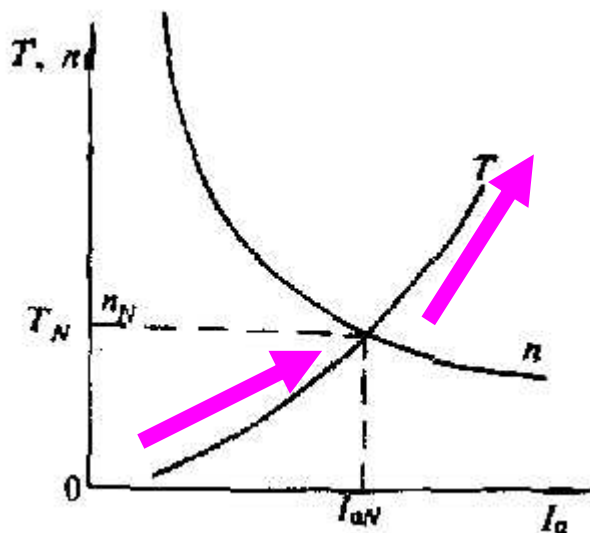
- 当负载电流（即励磁电流）很小时，铁心处于不饱和状态，主磁通随励磁成正比增加，即

$$\Phi = KI_a$$

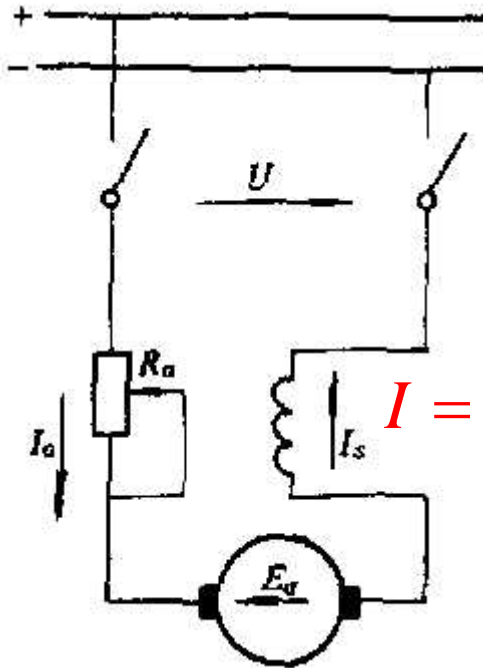
$$T = C_T \Phi I_a = C_T K I_a^2 = \frac{C_T}{K} \Phi^2$$

- 当负载电流较大时，铁心饱和，主磁通随励磁变化较小（近似不变）

$$T = C_T \Phi I_a \propto I_a$$



II 串励电动机的特性

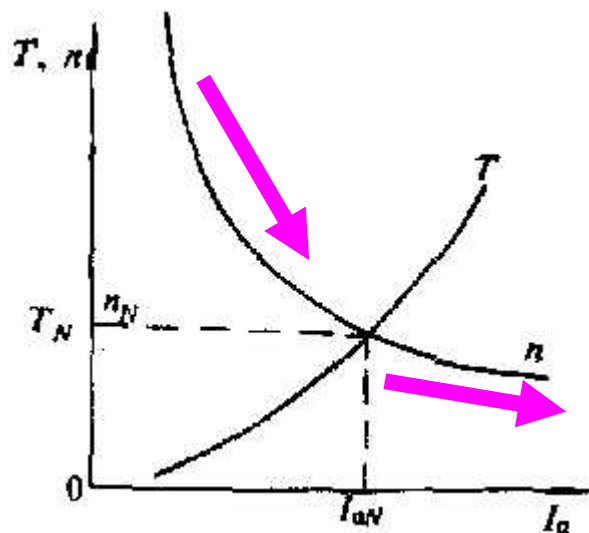


2. 转速特性 $n=f(I_a)$

$$n = \frac{U - I_a \sum r_a - 2\Delta U}{C_e \Phi}$$

当负载电流很小时，铁心处于不饱和状态，主磁通随励磁成正比增加，即 $\Phi = KI_a$

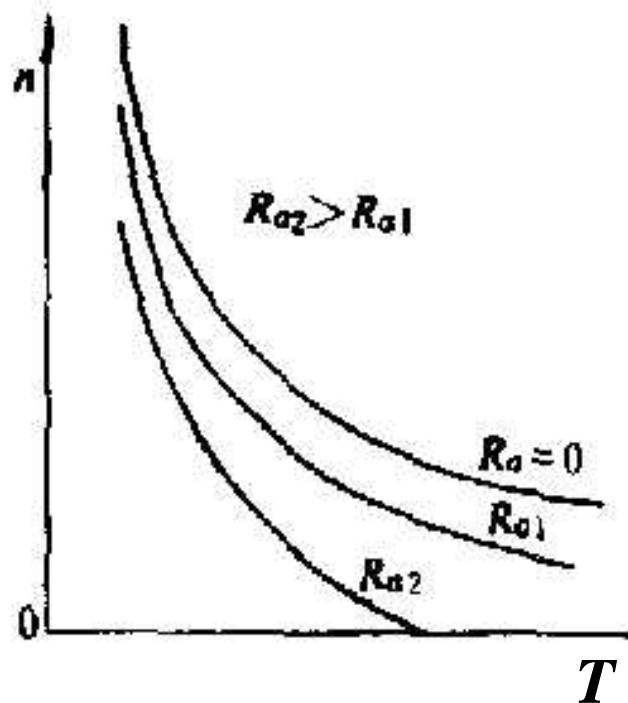
$$n = \frac{U - I_a \sum r_a - 2\Delta U}{C_e \Phi} = \frac{U - 2\Delta U}{C_e KI_a} - \frac{\sum r_a}{C_e K}$$



当负载电流较大时，铁心饱和，主磁通随励磁变化较小，随电流增加转速略有下降

II 串励电动机的特性

3. 机械特性 $n=f(T)$



$$n = \frac{U - 2\Delta U}{C_e \Phi} - \frac{\sum r_a}{C_e C_T \Phi^2} T$$

$$T = C_T \Phi I_a = C_T K I_a^2 = \frac{C_T}{K} \Phi^2$$

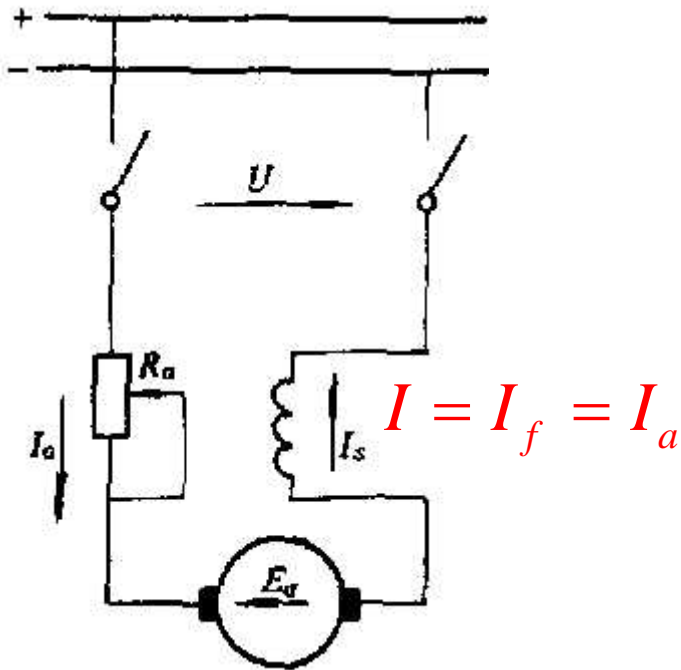
$$n = \frac{U - 2\Delta U}{C_e \sqrt{\frac{K}{C_T} T}} - \frac{\sum r_a}{C_e K} = \frac{U - 2\Delta U}{a \sqrt{T}} - b$$

在工作范围内，转速随负载电流急剧变化——软特性。

$$\text{转速变化率} = \frac{n\left(\frac{1}{4}\right) - n_N}{n_N}$$

不能在极轻负载下运行

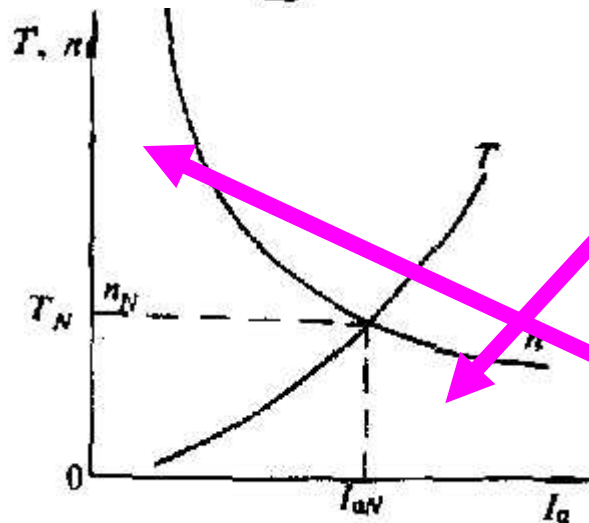
II 串励电动机的特性



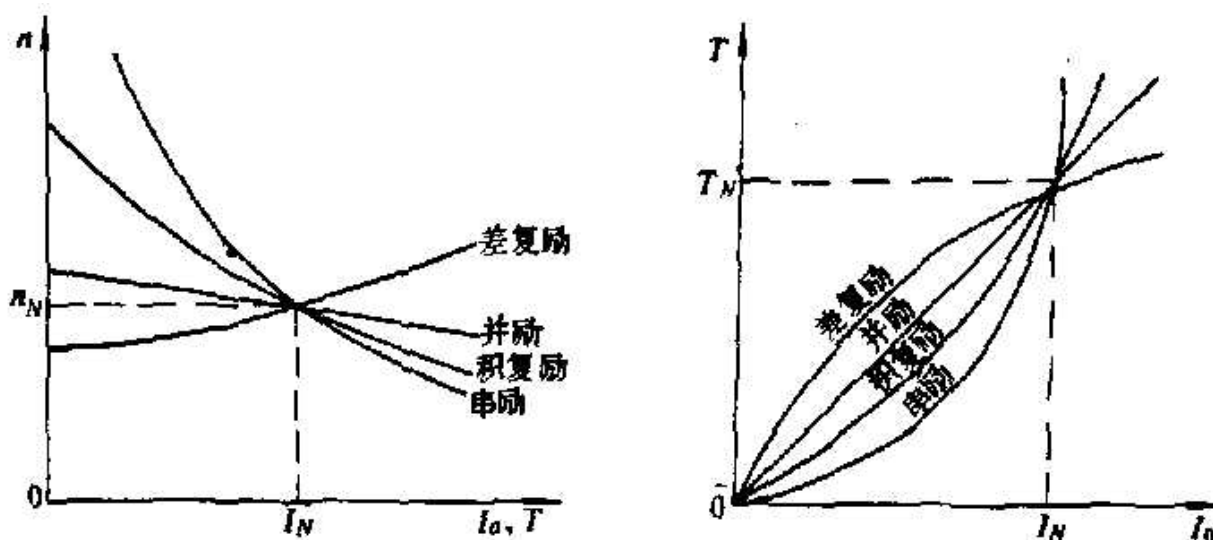
注意：串励电动机不允许空运行，也不能带很轻负载，否则容易引起“飞速”。

“飞速”的解释

1. 在满载或较重负载时，电枢电流较大， $I_f = I_a$ 较大，气隙磁通较大，电机只需不太高的转速便能产生较高的反电势与电网电压平衡；
2. 在空载或很轻负载时， $I_f = I_a$ 很小，使主磁通很小，电机必须以很高的转速才能产生反电势保持电压平衡



III 复励电动机的特性



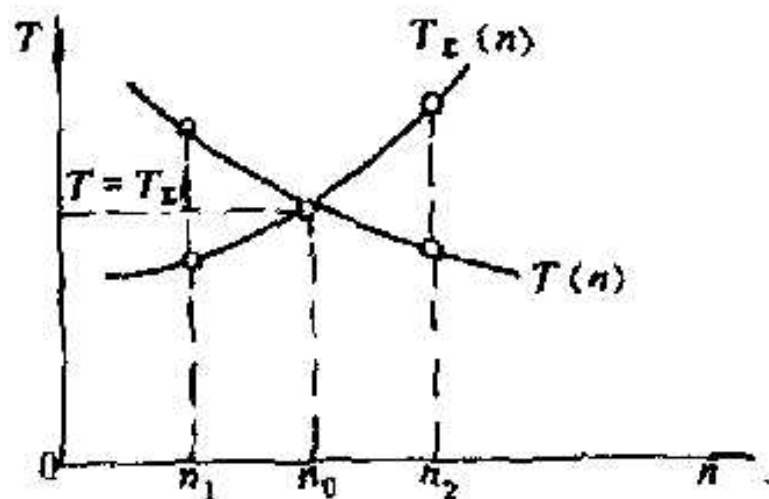
以并励为主的积复励:

当负载转矩突然增加时，电枢电流增大（电枢反应去磁作用增强），串励磁势增加，使主磁通增大。

- 使电磁转矩很快的增大以克服突然增大的负载转矩；
- 使反电势很快的增大以减小电枢电流的冲击值。
- 当电枢反应去磁作用很强时，仍能使电机有下降的机械特性，保持其稳定运行。

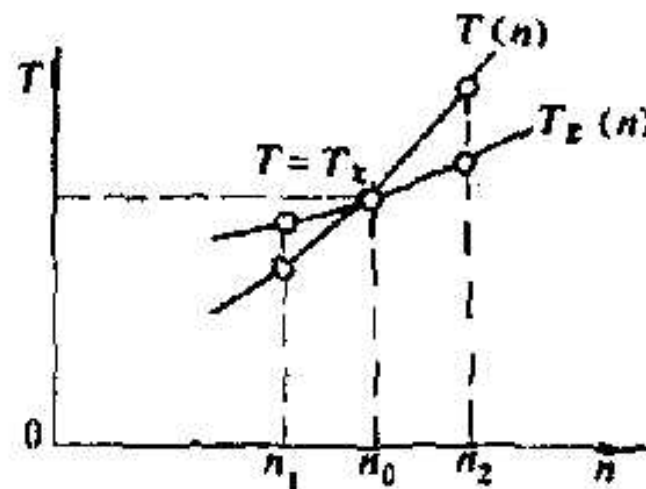
适当地选择并励磁势和串励磁势的相对强弱，可使复励电动机具有负载所需要的特性。

IV 直流电动机稳定运行条件



(a) 稳定运行

$$\frac{dT}{dn} < \frac{dT_{\Sigma}}{dn}$$



(b) 不稳定运行

$$\frac{dT}{dn} > \frac{dT_{\Sigma}}{dn}$$

在恒负载转矩条件下，下降的机械特性电动机能稳定运行，上升的机械特性电动机不能稳定运行。

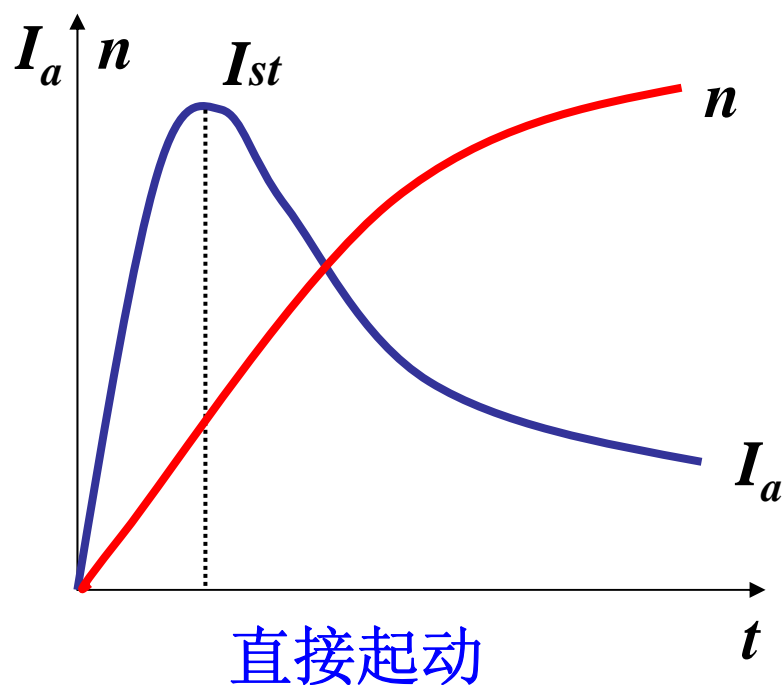
4. 直流电动机的 起动、调速和制动

- 直流电动机的起动
 - 直接起动
 - 电枢回路中串变阻器
 - 降压起动
- 直流电动机的调速
 - 调节励磁电流
 - 调节外施电源电压
 - 电枢回路中引入可调电阻
- 直流电动机的制动
 - 能耗制动
 - 回馈制动
 - 反接制动

I 直流电动机的起动

起动要求:

1. 足够大的起动转矩
2. 一定范围的起动电流
3. 起动时间符合生产要求、起动设备简单、经济、可靠



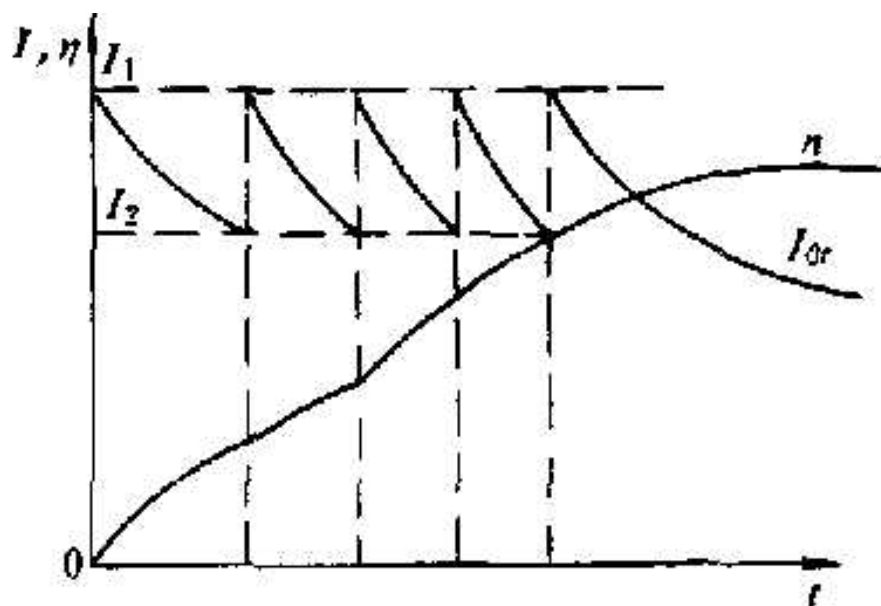
(1) 直接起动

- $t=0$ 时, $n=0$, $E_a=0$, $I_{st}=U/r_a$ 很大 ($10\sim 20I_N$)。副作用有: 损坏电枢绕组、导致换向器环火
- I_{st} 产生的起动转矩 T_{st} 也很大
- 随着速度增加, 反电势增加, 电枢电流反而下降

I 直流电动机的起动

(2) 电枢回路中串变阻器：限制起动电流

- 变阻器起动：起动时，在电枢回路中串入变阻器，当转速逐渐上升时，可把起动电阻逐级切除。
- 起动过程中，每切除一级起动电阻时，起动电流变将突然跃升，通常把起动电流限制在两个极限值之间。



I 直流电动机的起动

(3) 降压起动

- 一般只适用于大容量频繁起动的直流电动机，须用专门的调压电源。
- 优点：起动电流小，起动消耗能量少，升速比较平稳。
- 在起动过程中，可逐步提升电源电压，使按需要的加速度上升。在实用中，发电机-电动机组即采用降压起动法，其中，发电机及电动机均采用他励，以保证起动时有足够的励磁电流。“整流器-电动机”组也采用此方法。

II 直流电动机的调速

基本要求：调速幅度宽广、调速连续平滑、损耗小、经济指标高等。

电枢回路中的串联电阻

$$n = \frac{U - I_a(r_a + R_a) - 2\Delta U}{C_e \Phi}$$

1. 调节励磁电流以改变每极磁通 Φ ；
2. 调节外施电源电压 U ；
3. 电枢回路中引入可调电阻 R_a 。

调速性能：

速比：最高与最低速度之比；平滑性或跳级调速；**经济性：**损耗、效率，调速设备简单、可靠、操作方便等。

II 直流电动机的调速

1. 调节励磁电流以改变每极磁通 Φ

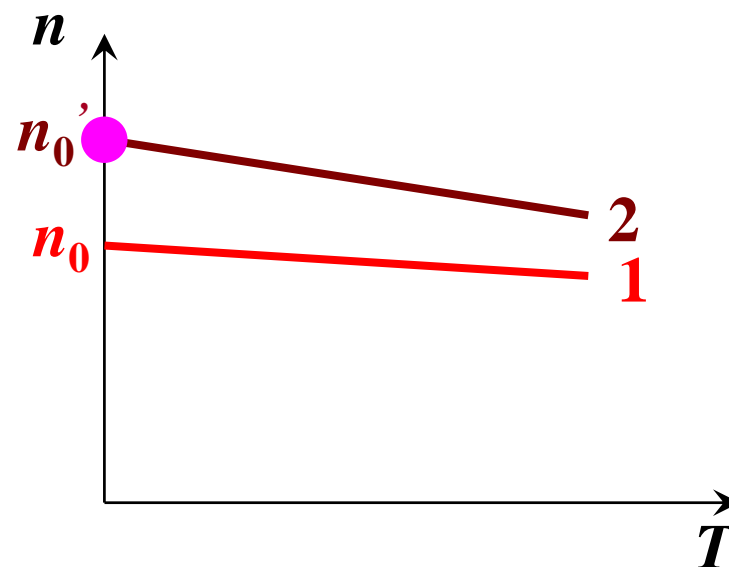
$$n = \frac{U - 2\Delta U}{C_e \Phi} - \frac{\sum r_a}{C_e C_T \Phi^2} T$$

调速过程:

➤ 增加励磁回路中串联电阻 $\sum r_f$ ，则励磁电流减小，每极磁通 Φ 减小；

➤ n 不变， $E_a = C_e \Phi n$ 减小，电枢电流 I_a 增大，导致 $T = C_T \Phi I_a$ 将增加，使电机加速；

➤ 若负载转矩不变，则 I_a 必然增加，使电枢回路电阻压降增加，导致反电动势 E_a 减小，在新的转速下达到电压平衡。



$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{E_2}{E_1} \bullet \frac{\Phi_1}{\Phi_2}$$

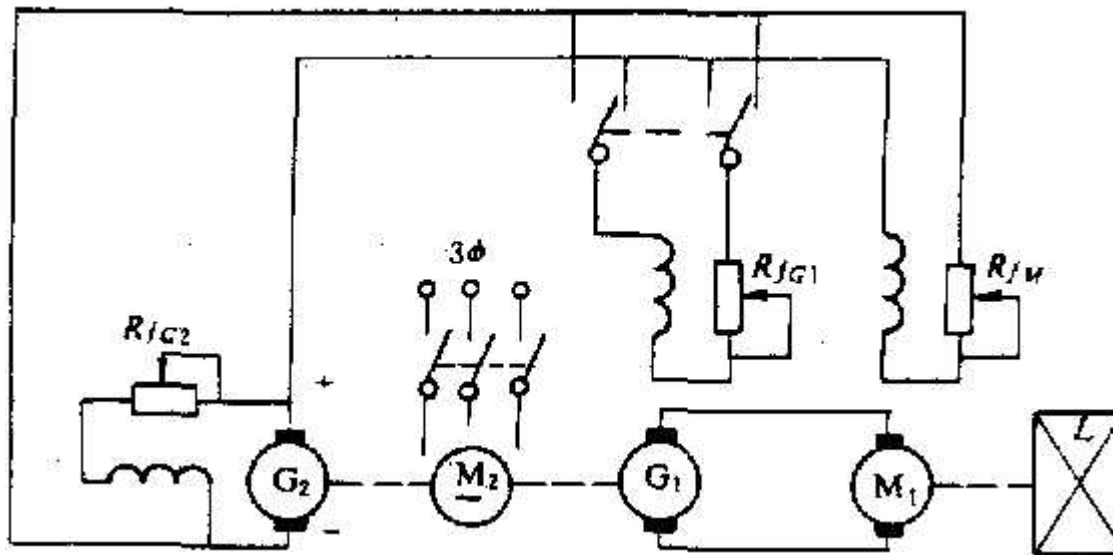
➡
$$\frac{n_2}{n_1} \approx \frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{I_{f1}}{I_{f2}}$$

II 直流电动机的调速

2. 调节外施电源电压 U 励磁恒定时，如他励

$$n = \frac{U - I_a(r_a + R_a) - 2\Delta U}{C_e \Phi} \approx \frac{U}{C_e \Phi} = kU \rightarrow \frac{n_2}{n_1} \approx \frac{U_1}{U_2}$$

- 在很广的范围内平滑调速，且电动机的机械特性硬度保持不变。



II 直流电动机的调速

3. 电枢回路中串可变电阻 R_a

$$n = \frac{U - I_a(r_a + R_a) - 2\Delta U}{C_e \Phi}$$

改变电阻 R_a ，即相当于改变了电动机的电枢绕组两端电压。

- 效率低
- 负载转矩较小时，电枢电流小，调节作用不大
- 电动机机械特性变软，使转速变化率增大

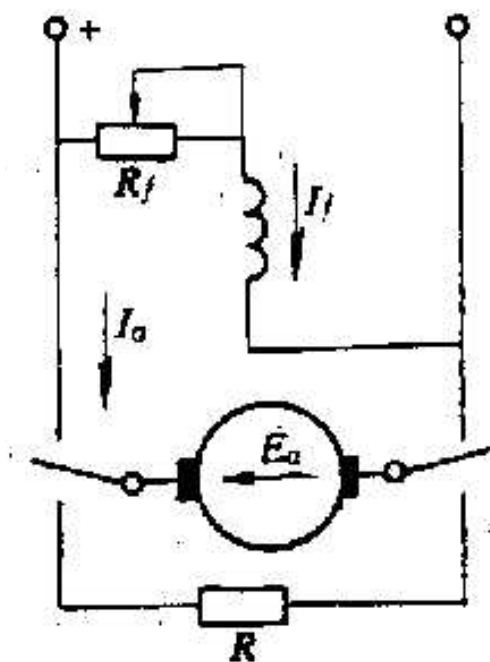
一般从调速范围、连续平滑性、调速中电能消耗、设备投资经济性等方面比较各种调速的优缺点。

适用范围主要指适用于恒转矩或恒功率、有级或无级调速、适用与大中型或小型电机等。

III 直流电动机的制动

制动：即在转动方向产生阻力矩，使电机尽快停转或由高速进入低速运行。

1. 能耗制动：动能制动



- 将电动机的电枢回路从电源断开后，立即接到一个制动电阻 R 上，电机的励磁电流保持不变；
- 电机依据转子动能继续旋转，电机变成他励发电机运行，将贮藏在转动部分的动能变为电能，在电阻负载中消耗掉；
- 电枢电流所产生的电磁转矩方向与转子旋转方向相反，产生制动作用，使转速迅速下降，直至停转。

III 直流电动机的制动

2. 回馈制动

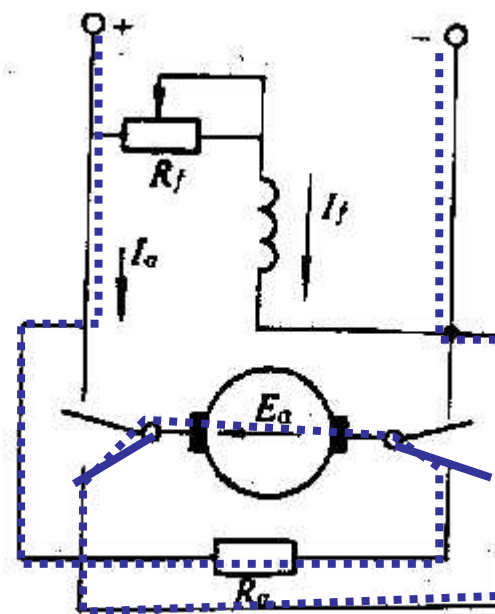
- 当电动机的转速高于某一数值时，电动机的反电势 E 大于电机电源电压 U ，即 $E > U$ ，电枢电流将反向，电机进入发电机的运行状态而起制动作用，可限制转速的持续上升。适用于由串励电动机驱动的升速场合，如电车下坡。
- 为保证励磁，需将串励绕组改为他励，且施加一定的励磁电压。
- 电功率回馈至电网，其来源于电车下坡时所释放的位能。

III 直流电动机的制动

3. 反接制动

励磁回路不变，电枢回路反接

$$\begin{aligned} n &= \frac{E}{C_e \Phi} = \frac{-U - I_a (r_a + R_a)}{C_e \Phi} \\ &= \frac{-U}{C_e \Phi} - \frac{R_a + r_a}{C_e C_T \Phi^2} T_M' \end{aligned}$$



当转速为零时，制动转矩不为零，应及时将电源切除，否则将反转。

作业

➤习题: *p.* 358~359: 17-4~17-6、17-10